核电厂数字化主给水控制系统动态可靠性评估方法

郑梦琰[1]，李坤祥[1]，隋阳[1,2,†]

(1. 南华大学核科学技术学院，湖南 衡阳 421001；2. 福建福清核电有限公司，福建 福清 350300)

摘 要：传统静态可靠性评估方法难以表征核电厂数字化控制系统的动态交互性和时间依赖性。为了解决这一问题，以数字化主给水控制系统（DMFCS）为研究对象，提出了一种基于动态故障树（DFT）和动态贝叶斯网络（DBN）的动态可靠性评估方法，对 DMFCS 进行动态可靠性评估。首先，应用 DFT 方法，建立了表征 DMFCS 动态交互性的 DFT 模型；然后，应用 DFT 至 DBN 的转换策略，建立了表征 DMFCS 时间依赖性的 DBN 模型；最后，通过 DBN 正向推理计算得到了 DMFCS 随时间变化的可靠度曲线，逆向推理计算得到了根节点的后验概率，重要度分析识别了系统薄弱环节。结果表明：所提方法能够很好地描述 DMFCS 的动态交互性和时间依赖性，分析结果为系统智能维护、日常检修提供了科学依据，进一步提高了 DMFCS 可靠性和安全性。

关键词：核电厂；数字化主给水控制系统；动态可靠性评估；动态故障树；动态贝叶斯网络

中图分类号：TL364　　**文献标志码**：A

chinaXiv:202308.00114v1

1 引言

核电厂数字化控制系统由硬件（如处理器、输入/输出和通信设备等）与软件组成，这些硬件和软件共同实现了系统的安全与保护功能[1]，数字化主给水控制系统（Digital Main Feedwater Control System, DMFCS）是数字化控制系统的重要组成部分，它的主要功能是对主给水系统进行实时监测、控制和优化，对核电厂的安全运行至关重要。数字化的引入极大地提高了 DMFCS 的效率和性能。然而，硬件、软件和人员操作之间的复杂交互作用，可能会使系统的故障变得更为复杂，这导致 DMFCS 具有动态交互性和时间依赖性。因此，研究核电厂 DMFCS 的动态可靠性具有重要意义。

近年来，国内外学者采用不同的研究方法对核电厂数字化控制系统的进行了可靠性研究，乔宁等[2]以反应堆某个停堆功能失效为顶事件，建立了数字化反应堆保护系统的故障树（Fault Tree, FT）模型，计算得出了保护系统停堆功能失效的概率。宗树枫[3]基于故障模式、影响及危害性分析（Fault Modes Effect and Criticality Analysis, FMECA）和可靠性框图（Reliability Block Diagram, RBD）方法对核电厂数字化反应堆控制系统进行了可靠性分析，分析了系统各设备的故障模式，计算了系统的可用率等数据。Son 等[4]应用马尔可夫模型计算分析了考虑各种参数的数字化反应堆保护系统可靠性，为早期设计安全关键系统时提供优化策略。

可靠性评估方法包括但不限于 FT、FMECA、RBD 和马尔可夫模型。经典方法如 FT、FMECA 和 RBD 难以准确全面地分析数字化系统的动态交互性和时间依赖性，难以处理软件、硬件、人因之间的功能依赖性以及组件或系统的多种故障模式。而马尔可夫模型适合于小型系统，随着系统变得复杂，会出现状态空间爆炸的问题，难以直接求解[5]。DFT 方法是目前动态可靠性分析较为常

收稿日期：年 月 日；**修改日期**：
基金项目：国家自然科学基金(52174189)
作者简介：郑梦琰(1997-)，男，湖北随州人，硕士研究生，从事核电厂系统可靠性评估和故障诊断方法研究；E-mail: zmyzmy97@163.com
† 通信作者：隋阳，E-mail: sydr374@163.com

用的方法之一，DFT 方法是在静态故障树的基础上引入动态逻辑门，能够表征系统的动态交互性。DFT 的求解方法包括马尔可夫链法、容斥原理法、组合法、生存标签法、蒙特卡洛仿真法等。其中，主要应用马尔可夫链法[6]，但马尔可夫链法存在计算复杂的问题。

近年来动态贝叶斯网络（Dynamic Bayesian Network, DBN）在可靠性领域受到了广泛应用，且弥补了 DFT 和马尔科夫方法的不足。DFT 可以转化为 DBN 模型，利用 DBN 的条件独立性，降低系统计算复杂度[7]。DBN 是 BN 在时间上的扩展，具有正向和逆向推理能力，是对复杂系统进行动态可靠性评估的有效方法[8]。DBN 基于由动态逻辑门转化的条件概率表，能够表达随机变量间的动态交互关系，有效表征系统的动态失效行为；同时，能够利用相邻时间片节点间的连接弧，分析系统的时间依赖关系，有效处理时序性和维修恢复问题。

因此，本文拟提出一种基于 DFT 与 DBN 的动态可靠性分析方法，以一个四环路压水堆核电厂 DMFCS 作为研究对象，综合考虑 DMFCS 的动态交互性和时间依赖性，建立基于 DFT 的 DBN 模型，进行正向、逆向推理，实现 DMFCS 动态可靠性评估，得出影响 DMFCS 可靠性的薄弱环节，为进一步提高系统可靠性和安全性提供依据。

2 数字化主给水控制系统简介

核电厂 DMFCS 结构简图如图 1 所示，它包含固件、软件、控制逻辑、处理器、看门狗（WatchDog Timer，WDT）、输入/输出和底座等部件。其中，控制逻辑部件采用三冲量（实测水位、蒸汽流量和实测给水流量）液位控制方案，处理器 A 为主处理器，处理器 B 为热备用处理器，当处理器 A 发生故障、中断或需要维护时，系统自动切换到处理器 B，以保持系统的正常运行。

DMFCS 含有 4 个环路并列的液位控制逻辑，分别实现 4 个环路的蒸汽发生器液位控制，其控制功能为：通过监测蒸汽发生器内的水位，自动调节主给水的流量，以维持蒸汽发生器内的水位在安全范围内。它的主要实现过程为：现场参数通过传感器的测量转为模拟量信号，再进行模拟量和数字量的转换输入到处理器进行信号处理，并计算输出控制信号。处理器的计算程序包含主给水阀控制程序、旁路给水阀控制程序和给水泵控制程序等，在处理器的程序计算中，相应的测量值和设定值一同决定对应执行器的动作，实现阀门开度或泵转速的调整，从而维持蒸汽发生器的水位在安全范围内[9-10]。

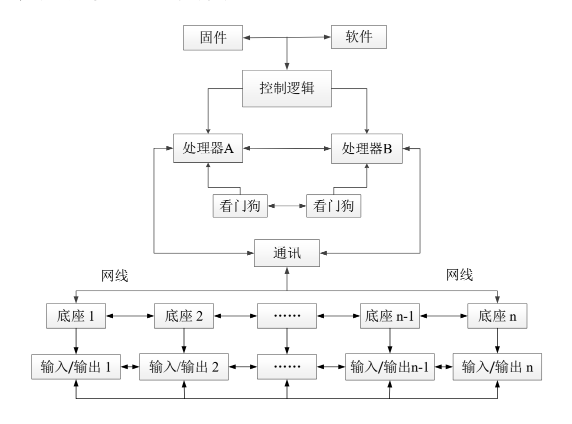


图 1 核电厂数字化主给水控制系统结构简图

3 数字化主给水控制系统 DFT 建模

3.1 DFT 基本原理

DFT 是一种图形建模方法，其在静态故障树的基础上，引入表征动态交互性的动态逻辑门，包括优先与门（Priority and gate, PAND）、顺序相关门（Sequence Enforcing gate, SEQ）、热备门（Hot Spare gate, HSP）、温备门（Warm Spare gate, WSP）、冷备门（Cold Spare gate, CSP）和功能相关门（Functional Dependency gate, FDEP）[11]，DFT 的 4 个动态逻辑门如图 2 所示。

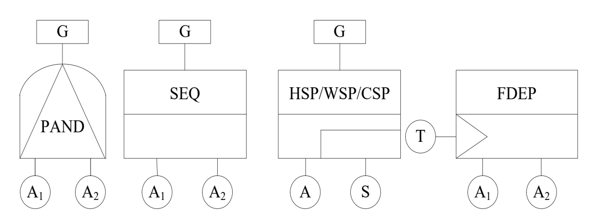


图 2 DFT 动态逻辑门

在 PAND 门中，所有输入事件按照预定顺序（在图形中表示为从左到右）发生，才会导致输出事件的发生。在 SEQ 门中，所有输入事件按照特定顺序发生，输出事件才会发生。PAND 门和 SEQ 门相似，其区别在于，PAND 门只允许输入事件按预定顺序发生，而 SEQ 门则需要检测输入事件是否按特定顺序发生。备用门包括热备门、温备门和冷备门。在备用门中，当一个主输入事件和一个或多个备用输入事件发生时，输出事件才会发生。备用输入事件在备用状态下的失效率为 $\alpha\lambda$，其中 λ 为备用输入事件在正常状态下的失效率，α 被称为休眠因子，且 $0\le\alpha\le1$。对于 HSP，$\alpha=1$；对于 WSP，$0<\alpha<1$；对于 CSP，$\alpha=0$。在

chinaXiv:202308.00114v1

FDEP 门中，触发输入事件 T 发生，将导致相关基本事件的发生[12]。

3.2 数字化主给水控制系统 DFT 模型的建立

应用 DFT 方法，建立 DMFCS 的 DFT 模型，其步骤如下：

（1）本文针对一个环路的蒸汽发生器液位控制功能进行可靠性评估，以主给水阀大阀故障维持作为顶事件。

（2）应用故障模式与影响分析方法，从上至下层层分析导致顶事件失效的中间事件和基本事件。

（3）引入静态逻辑门，表征事件间静态逻辑关系，引入动态逻辑门，表征事件间动态交互作用。经分析，本文引入 PAND 门处理双机切换线与处理器失效之间的优先失效问题，引入 HSP 门处理处理器 A 与处理器 B 的热备用问题。

经步骤（1）-（3），建立表征 DMFCS 动态交互的 DFT 模型，如图 3 所示。

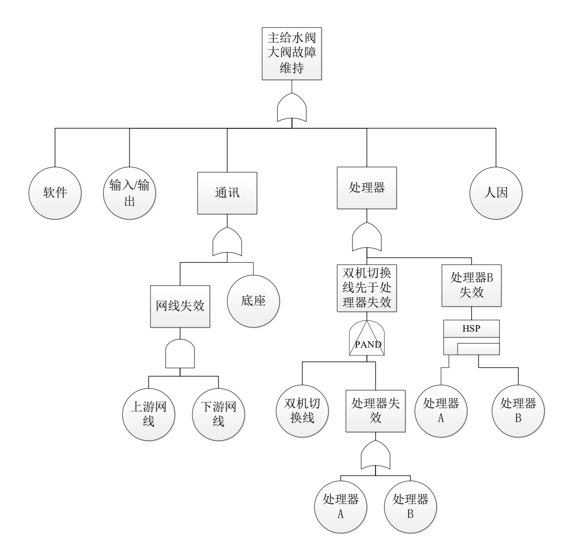


图 3 核电厂数字化主给水控制系统 DFT 模型

4 数字化主给水控制系统 DBN 建模

4.1 DBN 基本原理

BN 由有向无环图和条件概率表组成。节点和有向弧共同构成有向无环图，节点表示随机变量，有向弧表示相连节点之间的条件依赖关系，并采用条件概率表来量化这种关系[13]。对于一个具有 n 个节点 $X=\{X_1,X_2,\cdots X_n\}$ 的两态贝叶斯网络，联合概率分布可表示为：

$$P(X_1,X_2,\cdots,X_n)=\prod_{i=1}^{n}P(X_i\,|\,Pa(X_i)) \qquad (1)$$

DBN 是静态贝叶斯网络在时间上的延伸。相邻时间片之间的条件概率分布可表示为[14]：

$$P(X_t\,|\,X_{t-1})=\prod_{i=1}^{N}P(X_{t,i}\,|\,Pa(X_{t,i})) \qquad (2)$$

式中：X_t 和 X_{t-1} 分别表示 t 时刻和 t－1 时刻的节点，$X_{t,i}$ 表示第 t 个时间片中第 i 个节点，$Pa(X_{t,i})$表示 $X_{t,i}$ 的父节点集。

DBN 中节点在时间片 1 到 T 上的的联合概率分布为：

$$P(X_{1:T})=\prod_{t=1}^{T}\prod_{i=1}^{N}P(X_{t,i}\,|\,Pa(X_{t,i})) \qquad (3)$$

4.2 动态逻辑门向 DBN 的转化

本文在分析 DMFCS 可靠性时，通过在 DFT 建模中引入 PAND 门和 HSP 门表征系统的动态交互特性，依据 DFT 向 DBN 的转换策略，将 PAND 与 HSP 门转化为 DBN 结构，相应的图形转化和条件概率如表 1 所示。

4.3 基于 DBN 的可靠性分析

通过 DBN 的正向推理和逆向推理，对系统进行可靠度分析、后验概率分析和重要度分析。

（1）可靠度分析

根据根节点的先验概率以及各节点间的条件概率表，结合正向推理可计算得到叶节点的可靠度，叶节点失效概率计算公式如下：

$$P(T)=\sum_{i=1}^{n}P(X_i)\times P(T\,|\,X_i) \qquad (4)$$

（2）后验概率分析

应用 DBN 的逆向推理功能，计算得到叶节点失效时根节点在该时间段的后验概率，根节点后验概率计算公式为：

$$P(X_i\,|\,T)=\frac{P(X_i)\times P(T\,|\,X_i)}{P(T)} \qquad (5)$$

（3）重要度分析

重要度是衡量部件失效对系统失效影响重要程度的指标。概率重要度指根节点发生概率变化引起叶节点发生概率变化的程度；关键重要度指根节点失效概率的变化率与叶节点失效概率的变化率的比值[15]。

$$I_i^{Pr}=P(T=1\,|\,X_i=1)-P(T=1\,|\,X_i=0) \qquad (6)$$

$$I_i^{Cr}=\frac{P(X_i=1)}{P(T=1)}I_i^{Pr} \qquad (7)$$

式中：I_i^{Pr} 为根节点 X_i 的概率重要度；I_i^{Cr} 为根节点 X_i 的关键重要度。

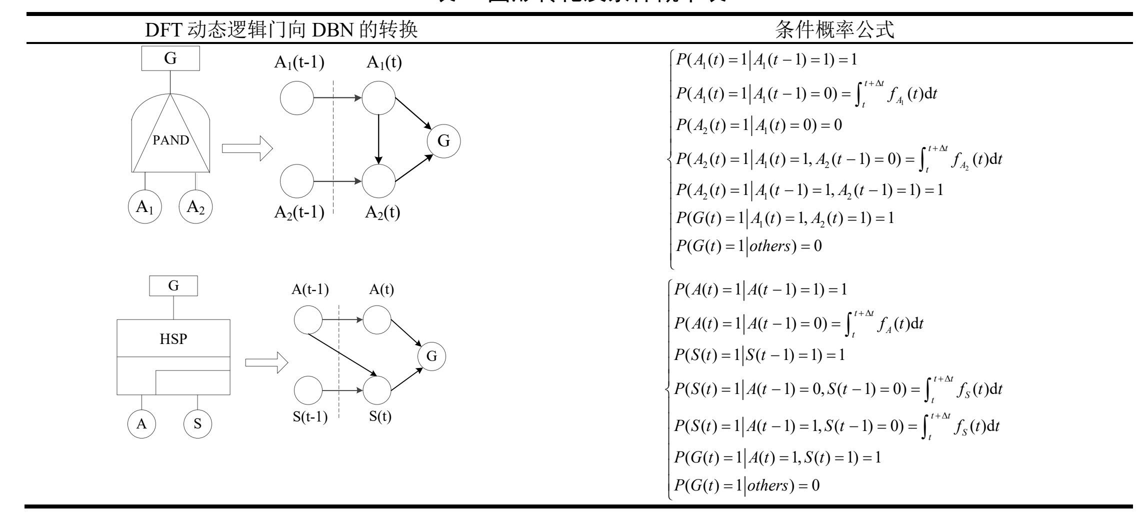
4.4 数字化主给水控制系统 DBN 模型的建立

（1）使用 DFT 至 DBN 模型的转换策略，将 DFT 模型中的基本事件、中间事件和顶事件分别转换为 DBN 模型中的根节点、中间节点和叶节点。

（2）参考文献[10]和核电厂 DMFCS 可靠性

chinaXiv:202308.00114v1

表 1 图形转化及条件概率表



DFT 动态逻辑门向 DBN 的转换	条件概率公式
PAND → DBN	$\begin{cases} P(A_1(t)=1 \mid A_1(t-1)=1)=1 \\ P(A_1(t)=1 \mid A_1(t-1)=0)=\int_t^{t+\Delta t} f_{A_1}(t)\mathrm{d}t \\ P(A_2(t)=1 \mid A_1(t)=0)=0 \\ P(A_2(t)=1 \mid A_1(t)=1, A_2(t-1)=0)=\int_t^{t+\Delta t} f_{A_2}(t)\mathrm{d}t \\ P(A_2(t)=1 \mid A_1(t)=1, A_2(t-1)=1)=1 \\ P(G(t)=1 \mid A_1(t)=1, A_2(t)=1)=1 \\ P(G(t)=1 \mid others)=0 \end{cases}$
HSP → DBN	$\begin{cases} P(A(t)=1 \mid A(t-1)=1)=1 \\ P(A(t)=1 \mid A(t-1)=0)=\int_t^{t+\Delta t} f_A(t)\mathrm{d}t \\ P(S(t)=1 \mid S(t-1)=1)=1 \\ P(S(t)=1 \mid A(t-1)=0, S(t-1)=0)=\int_t^{t+\Delta t} f_S(t)\mathrm{d}t \\ P(S(t)=1 \mid A(t-1)=1, S(t-1)=0)=\int_t^{t+\Delta t} f_S(t)\mathrm{d}t \\ P(G(t)=1 \mid A(t)=1, S(t)=1)=1 \\ P(G(t)=1 \mid others)=0 \end{cases}$

数据，确定核电厂 DMFCS 软硬件失效率，如表 2 所示，并将这些失效率的值作为根节点先验概率。同时，在参考文献[16-18]和核电厂系统人因可靠性数据的基础上，咨询了核电厂运行、测试和维护、设备和设施管理、可靠性分析和概率安全分析领域相关专家，假设人因节点的先验概率 0.000 8。

表 2 DMFCS 部件失效率

部件	失效率/h^{-1}
软件	1.00×10^{-6}
输入/输出	1.50×10^{-6}
上游网线	1.00×10^{-6}
下游网线	1.00×10^{-6}
底座	1.00×10^{-6}
双机切换线	1.00×10^{-6}
处理器 A	8.17×10^{-5}
处理器 B	8.17×10^{-5}

（3）依据 DFT 逻辑门向 DBN 模型的转换策略，将逻辑门转换成 DBN 模型中非根节点的条件概率表。

（4）由于人因失误的复杂性和不确定性，将其失效概率作为定值处理。假设系统和部件为只包含工作（W）和失效（F）的二态系统，系统部件寿命和失效后维修时间的分布服从指数分布，即根节点的失效概率密度函数和维修概率密度函数分别为 $f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$ 和 $m(t)=\mu e^{-\mu t}$ 。基于软硬件失效率和维修率来计算状态转移概率，用于描述系统失效过程和维修恢复过程随时间的动态变化。在不考虑维修的情况下，根节点状态转移概率可由式(8)和(9)计算；在考虑维修的情况下，根节点状态转移概率可由式(8)和(10)计算。

$$\begin{cases} P(X(t)=W \mid X(t-1)=W)=e^{-\lambda\Delta t} \\ P(X(t)=F \mid X(t-1)=W)=1-e^{-\lambda\Delta t} \end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases} P(X(t)=F \mid X(t-1)=F)=1 \\ P(X(t)=W \mid X(t-1)=F)=0 \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} P(X(t)=F \mid X(t-1)=F)=e^{-\mu\Delta t} \\ P(X(t)=W \mid X(t-1)=F)=1-e^{-\mu\Delta t} \end{cases} \tag{10}$$

式中：λ 为失效率，μ 为维修率。

经上述 4 个步骤，应用 DBN 模型建立和分析的常用软件（GeNIe 软件）[19-21]，建立了表征 DMFCS 动态交互性和时间依赖性的 DBN 模型，如图 4 所示。

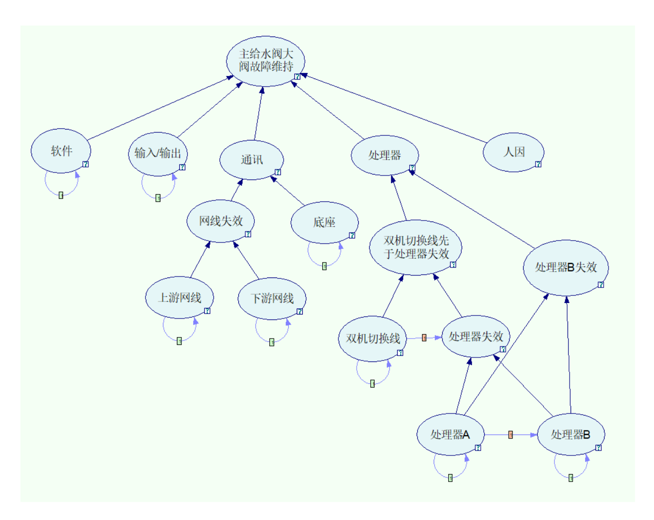


图 4 核电厂数字化主给水控制系统 DBN 模型

5 可靠性分析

5.1 可靠度分析

在不考虑维修因素的情况下，使用贝叶斯网络分析软件 GeNIe，进行 DBN 的正向推理，计算得到 DBN 叶节点、通讯模块和处理器模块随时间变化的可靠度曲线，结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出，不维修情况下的 DMFCS 可

chinaXiv:202308.00114v1

靠度在任务时间 10000 h 时可靠度为 0.772 520。同时，若不对系统进行定期试验和预防性维修，其通讯模块和处理器模块可靠度下降趋势更为明显，核电厂在制定维修策略时可以根据不同部件制定不同的维修周期。

定期试验和预防性维修是提高核电厂 DMFCS 可靠性的重要方法，假设定期试验和预防性维修周期为 60 d，即维修率 μ=6.94×10^{-4}/h，根据 DBN 正向推理，计算得到在考虑维修因素情况下的可靠度在 6300 h 趋于稳定，最终可靠度稳定值为 0.987 499，如图 6 所示。

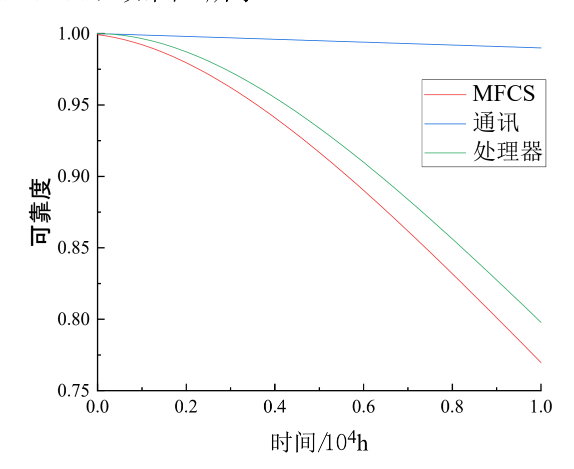


图 5 不考虑维修的 DMFCS 可靠度

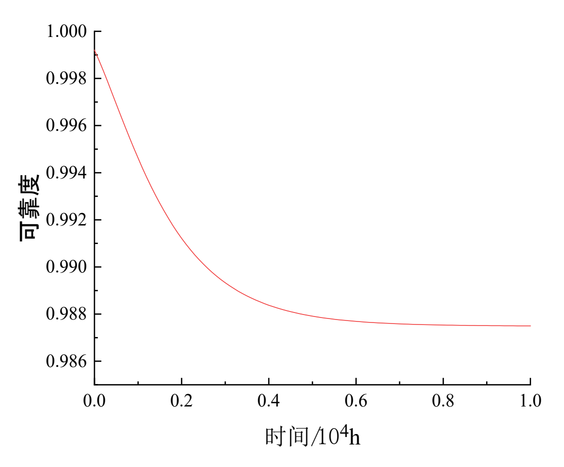


图 6 考虑维修的 DMFCS 可靠度

5.2 后验概率分析

根据 DBN 逆向推理，设定 10000h 时叶节点失效概率为 1，计算得到各根节点后验概率，结果如图 7 所示。后验概率结果可以帮助识别部件对系统的影响程度，根据各根节点后验概率值的比较，后验概率值较大的部件有输入/输出、软件、底座、处理器 A 和处理器 B。

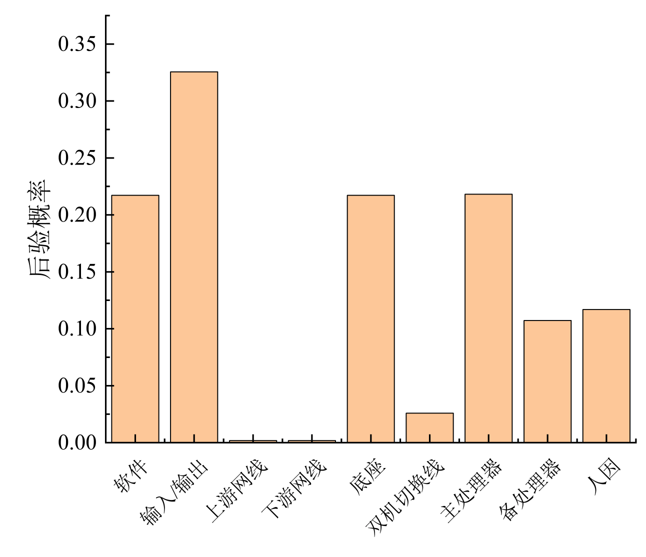


图 7 根节点后验概率

5.3 重要度分析

为衡量系统在故障时各部件对叶节点影响的重要程度，根据式(6)和(7)，计算在任务时间 10000 h 时各根节点的重要度，结果如表 3 所示。

表 3 根节点重要度

根节点	概率重要度	关键重要度
软件	0.993 808	0.118 215
输入/输出	0.994 547	0.177 319
上游网线	0.001 476	0.000 176
下游网线	0.001 476	0.000 176
底座	0.993 808	0.118 215
双机切换线	0.118 318	0.014 074
处理器 A	0.015 338	0.132 598
处理器 B	0.108 580	0.121 473
人因	0.993 124	0.063 557

根节点概率重要度排序结果为：输入/输出>软件=底座>人因>双机切换线>处理器 B>处理器 A>上游网线=下游网线。

根节点关键重要度排序结果为：输入/输出>处理器 A>处理器 B>软件=底座>人因>双机切换线>上游网线=下游网线。

对比分析根节点的重要度排序结果，其中输入/输出、主处理器、备处理器、软件和底座为关键重要度的较大值，说明这些部件对 DMFCS 影响程度较大，综合考虑根节点后验概率和关键重要度值，输入/输出、主处理器、备处理器、软件和底座这些部件为系统的薄弱环节，应采取有效措施提高这些部件的可靠性，例如在制定维修策略时应重点关注这些薄弱环节，针对输入/输出和处理器部件，可增加其冗余度；针对软件，可对系统软件进行严格的测试和验证，从而进一步提高系统可靠性。

chinaXiv:202308.00114v1

6 结论

（1）在分析 DMFCS 结构的基础上，考虑动态失效和时间依赖问题，应用 DFT 方法建立了表征系统动态交互性的 DFT 模型，应用 DBN 方法建立了基于 DFT 模型的表征系统时间依赖性的 DBN 模型，从而提出一种 DMFCS 动态可靠性评估新方法。

（2）利用 DBN 对 DMFCS 进行正向推理和逆向推理，正向推理得到了考虑和不考虑维修因素情况下的 DMFCS 的可靠性结果；逆向推理得到了系统各根节点后验概率大小。分析结果为开展核电厂 DMFCS 定期试验和预防性维修提供了重要的理论依据。

（3）重要度分析得到了根节点的重要度排序结果，确定了系统的薄弱环节，为进一步提升核电厂 DMFCS 可靠性指明了确切的方向。

chinaXiv:202308.00114v1

参考文献：

[1] ZHOU Shiliang, WANG Hao, TIAN Cong. Nuclear Science and Engineering, 2018, 38(1): 88-98. (in Chinese)
(周世梁, 王浩, 田聪. 核科学与工程, 2018, 38(1): 88-98.)

[2] QIAO Ning, LIU Jingbin. Nuclear safety, 2020, 19(05): 75-79. (in Chinese)
(乔宁, 刘景宾. 核安全, 2020, 19(05): 75-79.)

[3] ZONG Shufeng. Reliability Analysis of Digtal Nuclear Power Control System of Nuclear Power Plant[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
(宗树枫. 核电厂数字化反应堆控制系统可靠性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.)

[4] SON K S, SEONG S H, KANG H G, et al. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 193: 106645.

[5] JIANG G J, LI Z Y, QIAO G, et al. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 5559475.

[6] NIE Guojian, Lei Linlin, Ge Zhijun, et al. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2020,38(03):1-6. (in Chinese)
(聂国健，雷林林，葛智君等. 电子产品可靠性与环境试验, 2020,38(03):1-6.)

[7] SHI Q, KANG J, WANG R, et al. International Journal of Performability Engineering, 2018, 14(10): 2280-2288.

[8] JIANG Lei, WANG Xiaomin, LIU Yiliu, et al. Journal of the Railways Society, 2020, 42(3): 85-92. (in Chinese)
(江磊, 王小敏, 刘一骝, 等. 铁道学报, 2020, 42(3): 85-92.)

[9] WANG Hao, YU Jiawei, ZHOU Shiliang, et al. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(12): 2330-2337.
(王浩, 余嘉炜, 周世梁, 等. 原子能科学技术, 2017, 51(12): 2330-2337.)

[10] LI Yankai. Research on Dynamic Analysis Methods Based on Simulation Technology for Nuclear Power Plant Digital Instrument and Control System[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
李延凯. 基于仿真技术的核电厂数字化仪控系统动态特性分析方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.

[11] GUO Dingqing, WANG Shaoxuan, LIN Zhixian, et al. Nuclear Physics Review, 2022, 39(04): 546-554. (in Chinese)
(郭丁情, 王韶轩, 林志贤, 等. 原子核物理评论, 2022, 39(04): 546-554.)

[12] MONTANI S, PORTINALE L, BOBBIO A, et al. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(7): 922-932.

[13] ZHANG Youpeng, YANG Jinfeng. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(7): 79-86. (in Chinese)
(张友鹏, 杨金凤. 铁道学报, 2017, 39(7): 79-86.)

[14] XING Shangpeng, SUI Yang. Science Technology and Engineering, 2022, 22(23): 10092-10101. (in Chinese)
(邢尚鹏, 隋阳. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 10092-10101.)

[15] XIA Yu, ZHAO Heming, ZHANG Hongtao, et al. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14): 5789-5795. (in Chinese)
(夏禹, 赵河明, 张鸿涛, 等. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5789-5795.)

[16] CHEN Qinqin, ZHANG Li, HU Hong, et al. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(04): 104-107. (in Chinese)
(陈青青, 张力, 胡鸿, 等. 核动力工程, 2019, 40(04): 104-107.)

[17] LI Pengcheng, ZHANG Li, DAI Licao, et al. Systems Engineering - Theory & Practice, 2016, 36(01): 243-252. (in Chinese)
(李鹏程, 张力, 戴立操, 等. 系统工程理论与实践, 2016, 36(01): 243-252.)

[18] MA Zhanguo. A Methodological Research of Digital I&C System Reliability and Human Machine Interaction Analysis for Nuclear Power Plant[D]. Haerbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
(马战国. 核电厂 D-I&C 可靠性与人机交互分析方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2018.)

[19] LI Shaoxiong, QI Jinping, BAI Xu. Modern Electronics Technique, 2021,44(21):78-82. (in Chinese)
(李少雄,齐金平,白旭. 现代电子技术,2021,44(21):78-82.)

[20] WANG Yihua. Researsh on Rellability Analysis of Artillery Chassis Transmission System[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2021. (in Chinese)
(王艺华. 火炮底盘传动系统可靠性分析研究[D].西安工业大学, 2021.)

[21] YIN Feng, ZUO Xin, WEN Yuxin, et al. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2022,42(07):133-134+138. (in Chinese)

(尹丰,左信,文雨欣等. 中国石油和化工标准与质量, 2022,42(07):133-134+138.)

chinaXiv:202308.00114v1

An Approach for Dynamic Reliability Assessment of Digital Main Feedwater Control System for Nuclear Power Plant

ZHENG Mengyan[1], LI Kunxiang[1], SUI Yang[1,2,†]

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hunan Hengyang, 421001, China;

2. Fujian Fuqing Nuclear Power Co., Ltd, Fujian Fuqing, 350300, China)

Abstract: It is difficult to characterize the dynamic interaction and time dependence of digital control systems for nuclear power plants (NPP) with the traditional static reliability assessment methods. In order to solve this problem, taking the digital main feedwater control system (DMFCS) as the research object, an assessment method for dynamic reliability of the DMFCS for NPP based on dynamic fault tree (DFT) and dynamic Bayesian network (DBN) methods was proposed in the following route. First, DFT analysis was firstly utilized to create the DFT for the DMFCS to characterize its dynamic interaction. Then, DBN method was used to create the DBN model based on the conversion strategy from DFT to DBN for the MFCS to characterize its dynamic interaction and time dependence. Finally, the reliability curve of the DMFCS over time was obtained through the forward inference, the posterior probability of root nodes were obtained through the backward inference, and the system weakness was identified through importance analysis. The results showed that the proposed method can well describe the dynamic interaction and time dependence of the DMFCS. The analysis results provide a scientific basis for intelligent maintenance and routine maintenance of the system, helping further improve the reliability and security of the DMFCS.

Key words: nuclear power plant; digital main feedwater control system; dynamic reliability assessment; dynamic fault tree; dynamic Bayesian network

chinaXiv:202308.00114v1

Received date: ; Revised date:

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52174189)

† **Corresponding author:** SUI Yang, E-mail: sydr374@163.com